

8

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開平9-214023

(43) 公開日 平成9年(1997) 8月15日

(51) Int. Cl. ⁶	識別記号	庁内整理番号	F I	技術表示箇所
H 0 1 S 3/05			H 0 1 S 3/05	
G 0 3 F 7/20	5 0 5		G 0 3 F 7/20	5 0 5
H 0 1 L 21/027			H 0 1 S 3/105	
H 0 1 S 3/105			H 0 1 L 21/30	5 1 5 B 5 2 7
審査請求 有 請求項の数 7 F D (全 8 頁)				

(21) 出願番号 特願平8-37575

(22) 出願日 平成8年(1996) 1月31日

(71) 出願人 000004237

日本電気株式会社

東京都港区芝五丁目7番1号

(72) 発明者 笠松 直史

東京都港区芝五丁目7番1号 日本電気株式会社内

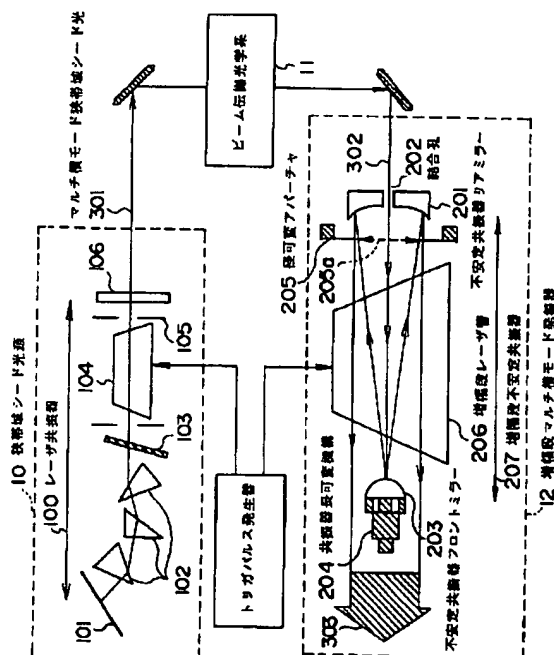
(74) 代理人 弁理士 桂木 雄二

(54) 【発明の名称】 注入同期レーザ装置

(57) 【要約】

【課題】低い空間コヒーレンスを有する狭帯域注入同期レーザ装置を提供する。

【解決手段】径可変アパーチャ205の直径と共振器長可変機構204により共振器長を調整することにより、増幅段不安定共振器207の等価フレネル数を整数に設定し、マルチ横モード発振可能な増幅段マルチ横モード発振器12を構成する。注入同期に十分な強度の、マルチ横モード狭帯域シード光301を増幅段マルチ横モード発振器12に注入することにより、発振出力を各横モードで注入同期し狭帯域化する。したがって、増幅段マルチ横モード発振器12は、マルチ横モード発振しながら、各横モードが狭帯域化されており、空間コヒーレンスは単一横モード時に比べ、1/(横モード数)に低くなる。



【特許請求の範囲】

【請求項1】 複数の横モードを含むレーザ光を生成するレーザ光源と、前記レーザ光を増幅する増幅段発振器と、からなる注入同期レーザ装置において、

前記増幅段発振器は、

増幅段レーザ媒質と、

前記レーザ光を反射するミラー光学系を含む共振器と、前記レーザ光の高次横モードが前記共振器に注入されるように径をできるだけ大きくした結合孔と前記共振器の等価フレネル数 N_{eq} を整数に設定するようにミラー光学系を調整する調整手段と、

からなることを特徴とする注入同期レーザ装置。

【請求項2】 前記共振器は、

前記レーザ光の径を拡大するように反射するフロントミラーと、

前記レーザ光を注入するための前記結合孔が中央に設けられ、且つ前記フロントミラーで反射された拡大レーザ光を平行光になるように反射するリアミラーと、

からなり、前記フロントミラーとリアミラーとの間に前記増幅段レーザ媒質が設けられていることを特徴とする請求項1記載の注入同期レーザ装置。

【請求項3】 前記調整手段は、

前記共振器の共振器長を変化させる共振器長調整手段と、

前記共振器の開口径を調整する可変アパーチャ手段と、からなることを特徴とする請求項1記載の注入同期レーザ装置。

【請求項4】 前記調整手段は、

前記フロントミラーを移動させて前記共振器の共振器長を変化させる共振器長可変手段と、

前記リアミラーの直前に設けられ、前記リアミラーの径を調整する可変アパーチャ手段と、からなることを特徴とする請求項2記載の注入同期レーザ装置。

【請求項5】 複数の横モードを含む前記レーザ光は、狭帯域ArFレーザにより得られることを特徴とする請求項1ないし4のいずれかに記載の注入同期レーザ装置。

【請求項6】 複数の横モードを含む前記レーザ光は固体レーザの高調波光により得られることを特徴とする請求項1ないし4のいずれかに記載の注入同期レーザ装置。

【請求項7】 複数の横モードを含む前記レーザ光は、複数の固体レーザ光の和周波光により得られることを特徴とする請求項1ないし4のいずれかに記載の注入同期レーザ装置。

【発明の詳細な説明】

$$N_{eq} = (a_2/M)^2 / \lambda L [g_1/g_2 (g_1 g_2 - 1)]^{1/2} \quad (1)$$

ここで、 $g_i = 1 - L/R_i$ 、 L ：共振器長、 R_i ($i =$

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は注入同期レーザ装置に係り、例えば半導体製造ステッパなどの露光用に適した低い空間コヒーレンスを有する注入同期レーザ装置に関する。

【0002】

【従来の技術】半導体メモリ(DRAM)製造のためのステッパ用露光レーザ光源としては、これまで高圧水銀ランプのi線(波長365nm; 64Mbitクラス)、KrFエキシマレーザ(波長248nm; 256Mbit)などが用いられてきた。しかし、次世代の1GbitDRAMに対してはKrFエキシマレーザでも解像度不足であるために、より短波長のArFエキシマレーザ(波長193nm)が有力候補として挙げられている。

【0003】露光用光源としてArFエキシマレーザを用いる場合、そのスペクトル幅(フリーランニング時500pm)が重要となる。露光装置の縮小投影光学系に、現行のステッパ方式の屈折光学系を用いる場合、ArFレーザの波長193nm域での透過硝材が石英に限定されるため、単色レンズ構成となり、光源スペクトルを狭帯域化する必要がある。

【0004】ArFレーザの狭帯域化は、通常、レーザ共振器内に波長選択素子(回折格子、プリズム及びエタロン)を挿入する方法がとられる。しかし、ArFではKrFに比べゲインが低いため、この方法では露光に十分なレーザ光強度が得られない。また出力を高めようとすれば、これら挿入された波長選択素子の吸収に基づく劣化が進行し、動作時間中に発振出力低下、スペクトル変動などの問題点が発生する。

【0005】これに対し、図5に示すように、低出力の狭帯域ArFレーザを狭帯域シード光源501とし、増幅段発振器502として不安定共振器503を組み合わせた注入同期法では、高出力ArFレーザ増幅段発振器502のスペクトルを効率よく抑制でき、狭帯域性を維持したまま露光に十分な出力が得られ、挿入素子の劣化も少ない。

【0006】しかし、このような従来の注入同期においては、増幅段を最低次横モード発振させるため、増幅段不安定共振器503の等価フレネル数 N_{eq} をモード弁別性の高い状態である非整数値に設定するのが一般的である。ここで、等価フレネル数 N_{eq} は、不安定共振器を記述する重要なパラメータであり、(数1)で与えられる(「アイトリプルイー、ジャーナルオブクванタムエレクトロニクス(IEEE、J-QE)」、19巻9号1426頁、アメリカ)。

【0007】

【数1】

1、2)：各共振器ミラーの曲率($i=1$ ：不安定共振

器フロントミラー、 $i=2$ ：不安定共振器リアミラー）、 $M=R_2/R_1$ ：ビーム拡大率、 a_2 ：リアミラー半径である。後に参照する図2（「レーザ（Laser）」、1986年、ユニバーシティサイエンスブック、p. 878、アメリカ）に示すように、 N_{eq} が非整数のときには、損失最小モードとそれ以外との間に、回折損失に大きな隔りがあるため、最低次横モードのみがフリーランニング時に優先的に発振する。注入同期においては、その最低次モードのみ注入同期すればよいから、注入同期動作のための閾値シード光エネルギーが非常に低く抑えられる。

【0008】反面、空間コヒーレンス長と横モード数とは、後述する（数2）に示すように、逆比例の関係にあり、この場合、単一横モード発振のため空間コヒーレンスが非常に高くなる。典型的には $1000\mu\text{m}$ （1mm）以上の空間コヒーレンス長を持つ（日経マイクロデバイス、1987年2月号、77頁）。

【0009】

【発明が解決しようとする課題】しかしながら、高い空間コヒーレンスを有する注入同期レーザは、露光に用いると、スペックルノイズの発生や不必要な干渉縞の形成など、Siウエハ面上での回路像形成に悪影響を及ぼすという問題点があった。

【0010】本発明は、このような従来法の欠点を除去して、露光用として十分な出力でかつ安定な狭帯域出力を保持したまま、低い空間コヒーレンスのレーザ装置を提供することを目的とするものである。

【0011】

【課題を解決するための手段】本発明による注入同期レーザ装置は、複数の横モードを含むレーザ光を反射するミラー光学系を含む共振器と、レーザ光の高次横モードが共振器に注入されるように径をできるだけ大きくした結合孔と、共振器の等価フレネル数 N_{eq} を整数に設定するようにミラー光学系を調整する調整手段と、からなることを特徴とする。より詳細には、共振器は、レーザ光の径を拡大するように反射するフロントミラーと、レーザ光を注入するための結合孔が中央に設けられ且つフロントミラーで反射された拡大レーザ光が平行光になるように反射するリアミラーと、からなる。等価フレネル数 N_{eq} を整数に設定するには、フロントミラーを移動させて前記共振器の共振器長を変化させ、且つリアミラーの径を変化させればよい。

【0012】より具体的には、狭帯域シード光源の出射光を増幅段発振器に注入する注入同期レーザ装置において、複数の横モードを持つ狭帯域シード光源と、増幅段発振器の等価フレネル数を整数に設定する径可変アパーチャ及び共振器長微調機構からなる調整手段と、シード光源からの複数横モード光を効率良く増幅段発振器に注入する結合孔を設けることを特徴としている。アパーチャの直径と共振器長を調整することにより、増幅段共振

器の等価フレネル数を整数に設定し、マルチ横モード発振可能な増幅段発振器を構成する。注入同期に十分な強度のマルチ横モード狭帯域シード光を増幅段発振器に注入することにより、発振出力を各横モードで注入同期し、狭帯域化する。したがって、増幅段発振器は、マルチ横モード発振しながら、各横モードが狭帯域化されており、空間コヒーレンスは単一横モード時に比べ、 $1/$ （横モード数）に短くなる。

【0013】

【発明の実施の形態】図1は、本発明による注入同期レーザ装置の一実施形態を示す概略的構成図である。この注入同期レーザ装置は、狭帯域シード光源10、ビーム伝搬光学系11、増幅段マルチ横モード発振器12及びトリガパルス発生器からなる。狭帯域シード光源10から出射したマルチ横モード狭帯域シード光301は、ビーム伝搬光学系11を通してマルチ横モード狭帯域シード光302として増幅段マルチ横モード発振器12へ入射し、そこで後述するように増幅され、狭帯域で低い空間コヒーレンスを有する注入同期光303が得られる。

【0014】注入同期用の狭帯域シード光源10としては、通常の方法で狭帯域されたArFエキシマレーザが採用される。このレーザは、レーザ共振器100内に波長選択素子（回折格子101、プリズム102、エタロン103）が挿入されている。狭帯域化の程度に応じ、挿入される素子の数、種類は決定される。この狭帯域ArFエキシマレーザは、基本的に安定共振器構成であり、大体 $200\sim 400\mu\text{m}$ 程度の空間コヒーレンス長 L_s をもつことが一般的に知られている（日経マイクロデバイス、1987年2月号、77頁）。空間コヒーレンス長とは、ビーム断面内の空間的に隔たった2点間の相関（干渉コントラスト）が $1/e$ （ e は自然対数の底）もしくは、ある定義に基づく値まで低下したときの、その2点間の距離である。安定共振器の横モードの数 N と空間コヒーレンス長 L_s との間及び横モード数 N とアパーチャ105の半径 a との間には、それぞれ（数2）及び（数3）の関係がある（「レーザ（Laser）」、1986年、ユニバーシティサイエンスブック、p. 696、アメリカ）。

【0015】

【数2】

$$L_s = A a \pi / N \quad (2)$$

【数3】

$$N = (a/w_0)^2 \quad (3)$$

ここで、 A ： L_s とビーム発散角 θ_d との関係式の比例係数（ $L_s = A \lambda / \theta_d$ ）、 a ：共振器内のアパーチャ半径（ほぼビーム半径）、 w_0 ：モードスポット半径である。したがって、一般的なエキシマレーザにおいて、 $a = 10\text{mm}$ 、 $L_s = 300\mu\text{m}$ 、 $A = 1$ とすると、横モード数 $N = 105$ となる。

【0016】次に、このマルチ横モード狭帯域シード光

301は適当なビーム伝搬光学系111を通過し、マルチ横モード狭帯域シード光302として増幅段マルチ横モード発振器12へと導かれる。マルチ横モード狭帯域シード光302は、増幅段マルチ横モード発振器12の不安定共振器リアミラー201に設けられた結合孔202を通過して不安定共振器フロントミラー203によって反射される。不安定共振器フロントミラー203は共振器長可変機構204によって移動可能である。不安定共振器フロントミラー203によって反射された光は、不安定共振器リアミラー201によって反射され、径可変アパーチャ205の可変アパーチャ205A及び増幅段レーザ管206を通して注入同期出力光303が出力される。

【0017】増幅段マルチ横モード発振器12に設けられた増幅段不安定共振器207は、不安定共振器リアミラー201の直前に設けられた直径を可変できる径可変アパーチャ205と、共振器の長さを可変できる共振器長可変機構204とからなる。この増幅段不安定共振器207は、従来の注入同期用の増幅段不安定共振器502と以下の2つの点で異なる。

【0018】(■)共振器の等価フレネル数 N_{eq} は整数付近に設定される。上述したように従来では非整数に設定されている。

【0019】(■)シード光導入用結合孔202の直径は、マルチ横モード狭帯域シード光302の高次横モードの通過を妨げないように、ある程度大きく取る(従来では小さな径である)。ただし、結合孔202からもれ出る発振出力が、出力結合率 $(1-1/M^2)$ より十分小さいことが必要である。

【0020】(■)の設計(即ち、共振器の等価フレネル数 N_{eq} は整数付近に設定することにより、増幅段不安定共振器207内に複数の横モードが発振可能になる。なぜならば、図2に示すように、等価フレネル数が整数の場合、複数の横モードが、同時に、同じ大きさの共振器回折損失を被るからである。

【0021】一般に不安定共振器は、図3に示すように(「レーザ(Lasers)」、1986年、ユニバーシティサイエンスブックス、p. 882アメリカ)、最低次の TEM_{00} ライクモードから、高次のモードまで発振する。これらは、厳密には安定共振器モード(したがって、シード光のモード)であるHermite-Gauss分布ではないが、空間周波数分布から考えて、空間的に近似可能である。

【0022】増幅段不安定共振器207は以下のように設計できる。まず、通常の注入同期レーザと同様、ポジティブブラン型共焦点共振器を想定する。 $M=10$ 、 $R_1=200\text{mm}$ 、 $R_2=2000\text{mm}$ とすると、共焦点なので共振器長は $L=900\text{mm}$ に一意に決まる。ここで、不安定共振器リアミラー201の半径(ほぼアパーチャ半径 $205a$) $a_2=10\text{mm}\sim 15\text{mm}$ 、共振器

長 $L=900\text{mm}\sim 1000\text{mm}$ と微調すると、図4に示すように、等価フレネル数 N_{eq} 20~60の範囲で変化させることが可能であることが分かる。したがって、共振器長で最大100mm程度の調整が可能な共振器長可変機構204と、アパーチャ半径で最大5mm程度の可変量のある径可変アパーチャ205を装着すればよい。

【0023】一方(■)の設計(即ち、シード光導入用の結合孔202の直径)は、次のようにして決定できる。結合孔半径を3.0mmとし、不安定共振器リアミラー半径 $a_2=10\text{mm}$ とすると、増幅段不安定共振器207内に9%のパワーロスがあるが、出力結合 $1-1/M^2=99\%$ より十分小さいため、発振特性に影響はほとんどない。このとき、(数3)により、狭帯域シード光301も共振器内アパーチャ105により半径3.0mmの開孔制限を受けているとすると、 $a=10\text{mm}$ のときの $(3/10)^2$ のモード数となるため、横モード数 $N=9.45$ となる。このモード数だけの横モードがマルチ横モード狭帯域シード光302として、増幅段不安定共振器207に注入される。

【0024】ところで、注入同期動作においては、マルチ横モード狭帯域シード光302の各横モードは、増幅段マルチ横モード発振器12の自然放出ノイズより大きな強度を持ち、かつ、増幅段マルチ横モード発振器12がフリーランニングで発振してしまう前に注入されなくてはならない。後者は、注入タイミングをトリガパルス発生器により制御することにより達成できる。露光に必要なエネルギーをパルスあたり50mJ程度とすると、注入同期の閾値シード光エネルギーは出力パルスエネルギーの 10^{-4} 程度であるから(「アイトリアルイー、ジャーナルオブクアンタムエレクトロニクス(IEEE, J-QE)」、19巻9号1426頁、アメリカ)、横モード数 $N=10$ 程度の設計では、 $50\text{mJ}\times 10^{-4}\times 10=50\mu\text{J}/\text{pulse}$ 程度のシード光出力があれば十分注入同期可能である。シード光出力として、通常の狭帯域化法で十分安定に、 $50\mu\text{J}/\text{pulse}$ 程度は出力できる。

【0025】このようにして、マルチ横モード狭帯域シード光302の各横モードは、増幅段マルチ横モード発振器12の各横モードを注入同期して狭帯域化されるため、空間コヒーレンス長は単一横モード発振時の $1/N$ (横モード数) $=1/10$ に低減される。

【0026】本発明の他の実施例として、注入同期用の狭帯域シード光源10として、狭帯域ArFレーザの代わりに、マルチ横モード発振する狭帯域固体レーザを用い、その非線形光学効果による高調波光を利用することもできる。また、複数の狭帯域固体レーザ光の和周波光を用いても、同様の効果が得られ、低い空間コヒーレンスな注入同期レーザ装置が得られる。

【0027】

【発明の効果】以上詳細に説明したように、本発明による注入同期レーザ装置では、狭帯域性を保持したまま、空間コヒーレンスは従来に比べ、 $1/(\text{横モード数})$ 以下に低減できる。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明による注入同期レーザ装置の一実施形態を示す概略的構成図である。

【図2】等価フレネル数と回折損失との関係を示すグラフである。

【図3】ビーム断面内の位置と強度との関係を示すグラフである。

【図4】不安定共振器リアミラー半径、不安定共振器長及び等価フレネル数との関係を示すグラフである。

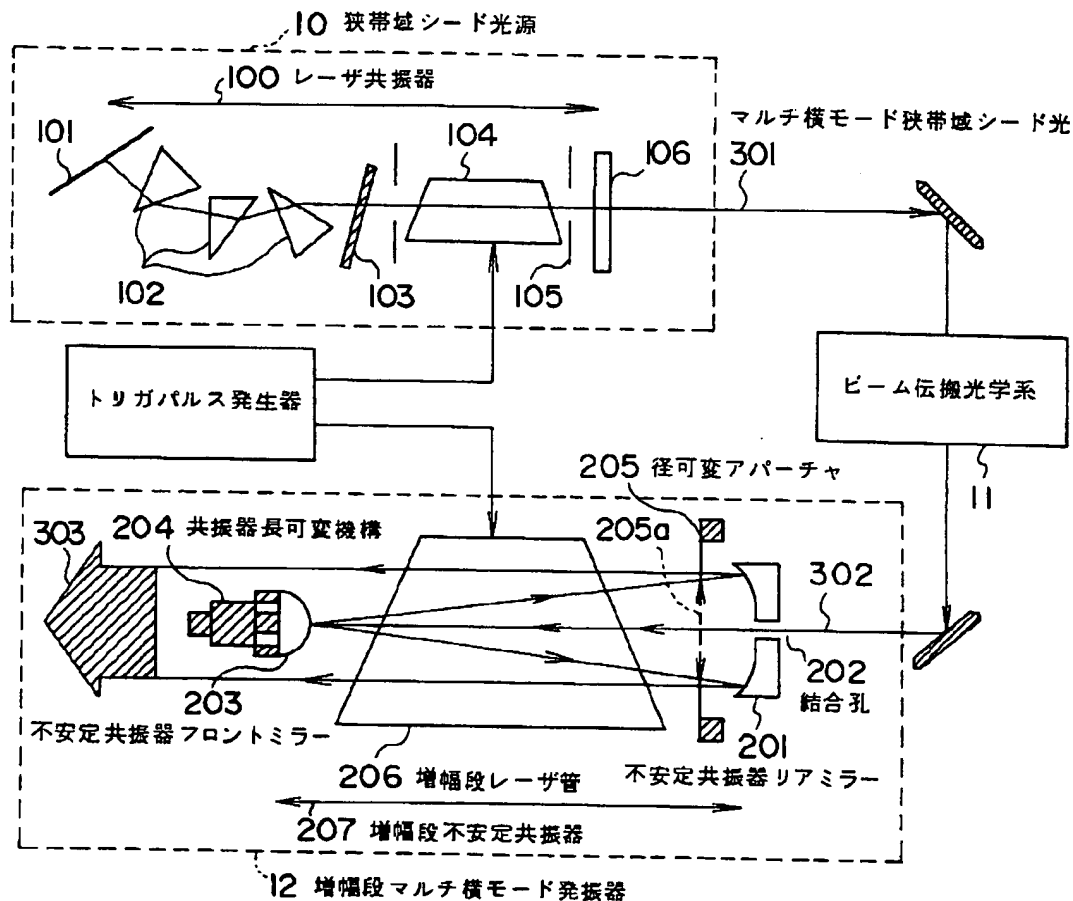
【図5】従来の注入同期レーザ装置の一例を示す概略的構成図である。

【符号の説明】

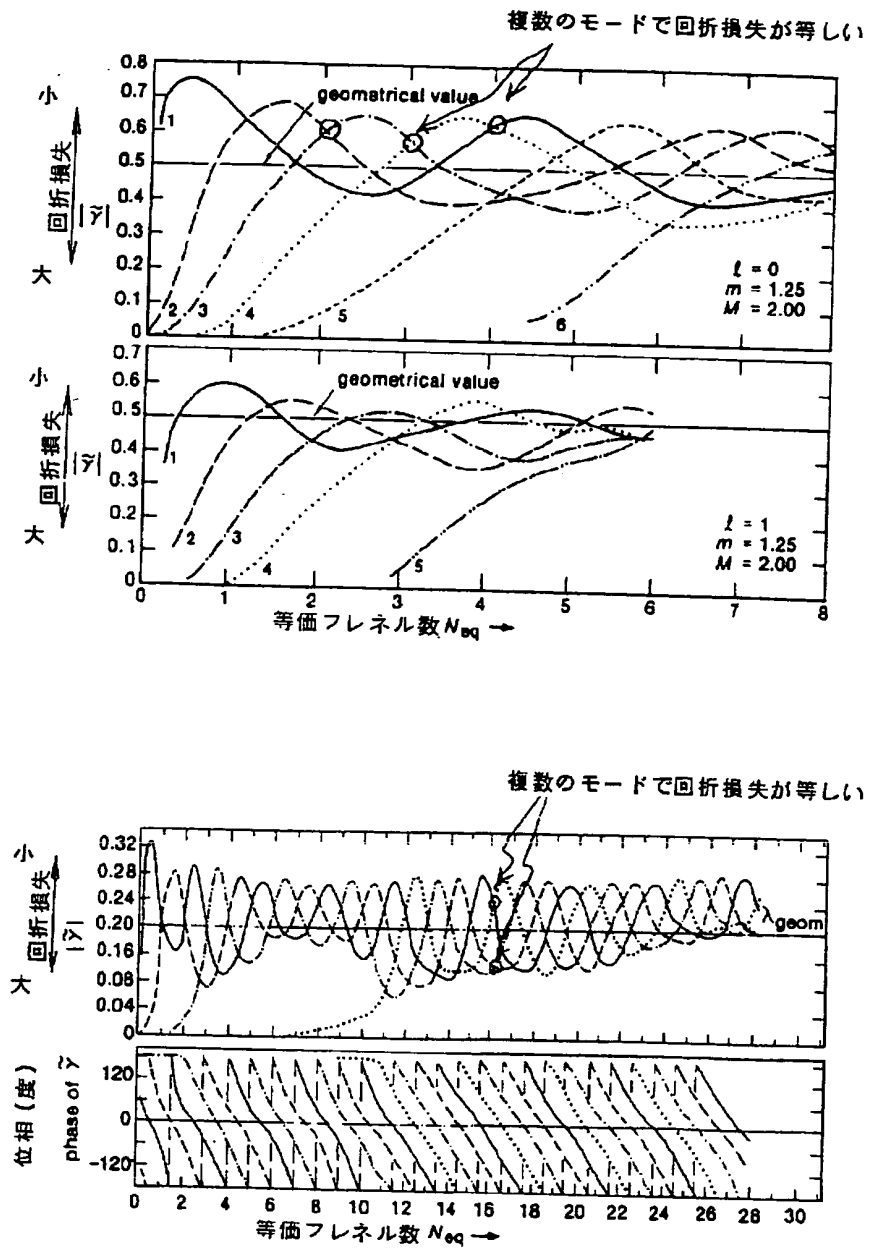
- 10 狭帯域シード光源
- 11 ビーム伝搬光学系
- 12 増幅段マルチ横モード発振器

- 100 レーザ共振器
- 101 回折格子
- 102 プリズム
- 103 エタロン
- 104 レーザ管
- 105 アパーチャ
- 106 出力鏡
- 201 不安定共振器リアミラー
- 202 結合孔
- 203 不安定共振器フロントミラー
- 204 共振器長可変機構
- 205 径可変アパーチャ
- 205a アパーチャ
- 206 増幅段レーザ管
- 207 増幅段不安定共振器
- 301 マルチ横モード狭帯域シード光
- 302 マルチ横モード狭帯域シード光
- 303 注入同期出力光

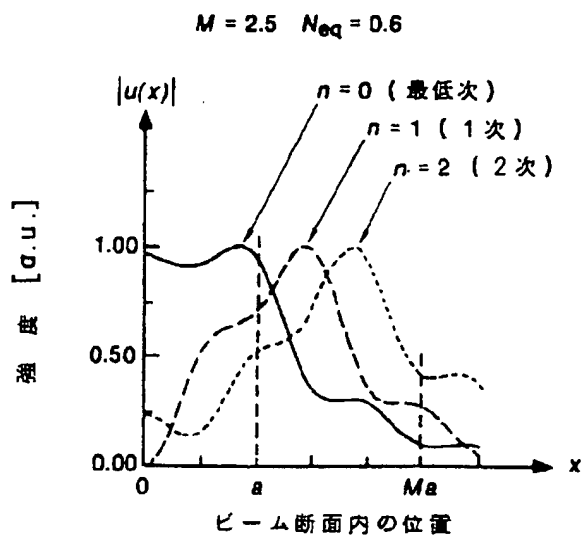
【図1】



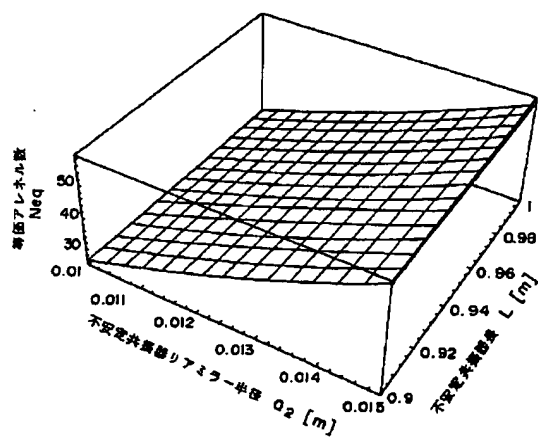
【図2】



【図3】



【図4】



【図5】

